

Численное моделирование влияния физических и химических факторов на межгодовую изменчивость содержания озона в Антарктике

С. П. Смышляев*, П. А. Блакитная*,
М. А. Моцаков*

Рассмотрена изменчивость общего содержания озона в Антарктике в период с 1980 по 2018 г. Проведен анализ трендов изменения содержания озона над Антарктикой в течение исследуемого периода, а также физических и химических процессов, влияющих на сезонную изменчивость содержания озона. Основное внимание уделено влиянию динамических процессов на устойчивость антарктического циркумполярного вихря, формированию полярных стратосферных облаков, а также влиянию газофазных и гетерогенных процессов на поверхности полярных стратосферных облаков и сульфатного аэрозоля. Методом исследования является анализ результатов наземных и спутниковых наблюдений и численное моделирование физических и химических процессов над Антарктикой с использованием глобальной модели состава атмосферы с задаваемыми на основании данных реанализа динамическими параметрами.

Ключевые слова: общее содержание озона, Антарктика, численное моделирование, данные реанализа, спутниковые наблюдения, наземные наблюдения.

1. Введение

Атмосферный озон является газом, который защищает Землю от губительного воздействия ультрафиолетового излучения Солнца [1]. При этом по химическим свойствам озон является токсичным газом, приводящим к затруднению дыхания и другим негативным воздействиям на организм человека [27]. В процессе эволюции системы Земли сложилось оптимальное распределение озона в атмосфере, когда большая его часть находится выше 20 км, т. е. в стратосфере, а в приземном слое — лишь малая часть атмосферного озона в количествах, не представляющих опасности для человека, животных и растений [10, 18].

В последние десятилетия сформировалась тревожная тенденция, когда одновременно стало уменьшаться содержание озона в стратосфере, а в отдельных районах стала увеличиваться его концентрация в приземном слое атмосферы [32]. Благодаря усилиям международного сообщества были оперативно определены попадающие в атмосферу с поверхности земли вещества, способствующие разрушению стратосферного озона, и были при-

* Российский государственный гидрометеорологический университет; e-mail: smyshl@rshu.ru (Смышляев Сергей Павлович).

няты меры по ограничению их выбросов в атмосферу. К настоящему моменту наметились тенденции к восстановлению содержания озона в стратосфере [33].

Тем не менее в полярных районах Земли и, прежде всего, в Антарктике сезонная и межгодовая изменчивость содержания стратосферного озона существенно отличается от характерной для других широт [4, 5, 10]. Это связано с особым динамическим режимом, формирующимся в Антарктике, когда в течение длительного времени полярной зимой и в начале весны циркумполярный вихрь [16] над антарктической зоной изолирует полярную область от обмена теплом и массой со средними широтами. Внутри циркумполярного вихря происходят процессы, ведущие к охлаждению стратосферы, к формированию полярных стратосферных облаков (ПСО), к перераспределению химических компонентов, что приводит к быстрому разрушению озона антарктической весной, когда Солнце возвращается в полярные области после окончания полярной ночи [18, 19].

Явление резкого уменьшения содержания озона над Антарктидой, названное озоновой дырой, интенсивно изучают с середины 1980-х годов до настоящего времени [2, 11, 25, 27]. Результаты проведенных исследований показали, что увеличение содержания хлорных и бромных газов, происшедшее во второй половине XX в. повсеместно по земному шару [24], в Антарктике привело к интенсификации процессов гетерогенной активации галогенных составляющих на поверхности полярных стратосферных облаков, формирующихся в стратосфере при температуре ниже 200 К внутри циркумполярного вихря [8, 9, 17, 26]. В результате длительно происходящих гетерогенных процессов на ПСО в условиях устойчивого циркумполярного вихря полярной ночью в нижней стратосфере над Антарктикой накапливается большое количество нестойких к воздействию солнечной радиации хлорных и бромных резервуарных газов, которые после возвращения Солнца быстро распадаются и высвобождают галогенные радикалы, разрушающие озон в хлорных и бромных каталитических циклах [30]. В сочетании с наблюдающимися одновременно процессами денитрификации и дегидратации полярной стратосферы это приводит к быстрому уменьшению содержания озона антарктической весной, т. е. к формированию озоновой дыры [11, 29].

Однако межгодовая изменчивость содержания озона в стратосфере над Антарктикой в значительной степени определяется не только содержанием озоноразрушающих веществ, но и изменчивостью динамических условий, влияющих на устойчивость антарктического циркумполярного вихря [9, 17, 20, 26] и на изменчивость температуры стратосферы, в частности на наблюдаемое параллельно с глобальным потеплением в нижней тропосфере охлаждение стратосферы [28]. Среди процессов, влияющих на устойчивость циркумполярного вихря, следует выделить внезапные стратосферные потепления [10], изменение температуры поверхности океана и периодические колебания, влияющие на общую циркуляцию атмосферы, такие как южное колебание (явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья) [19], квазидвухлетние колебания [27] и осцилляция Маддена — Джулиана [29]. Среди наиболее мощных стратосферных потеплений можно отметить событие в сентябре 2002 г., приведшее к необычно высокому содержанию озона в Антарктике в этом году [20, 26].

Исследования последних лет показывают, что после четко выраженной межгодовой тенденции устойчивого уменьшения содержания озона над Антарктикой в конце XX в. [32] в течение первых 10—15 лет XXI в. оно мало изменяется [33]. При этом для этой территории характерна значительная межгодовая короткопериодная изменчивость, которая, скорее всего, связана не с изменчивостью содержания озоноразрушающих веществ, а с влиянием динамических факторов [9, 27]. Несмотря на то что механизмы совместного влияния химических и динамических факторов на содержание озона над Антарктикой в последние годы стали более понятны [32, 33], многие аспекты сезонной и межгодовой изменчивости озона в Антарктике требуют дальнейшего прояснения.

Настоящая работа посвящена анализу результатов спутниковых и наземных измерений содержания озона в стратосфере Антарктики в 1980—2018 г., сравнению наблюдаемых трендов содержания озона в XX и XXI вв. и исследованию атмосферных процессов, ответственных за формирование аномалий содержания озона в Антарктике, выявлению сходства и изучению последствий влияния изменений климата на физические и химические процессы в Антарктике, которые могут привести к ухудшению состояния озонового слоя Земли.

2. Методика исследования

Анализ результатов наблюдений за общим содержанием озона (СО) над Антарктикой в течение исследуемого периода (1980—2018 гг.) проведен на основании данных наземных и спутниковых измерений. Станции в Антарктике, для которых в рамках настоящей работы осуществлен анализ изменения содержания озона, отбирали из станций сети WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) [34]. Для станций, приведенных в таблице, на основании данных WOUDC была создана база данных. Наземные измерения содержания озона на этих станциях выполняли с помощью спектрофотометров Dobson, Brewer и SAOZ, а также фильтровых приборов M-83 и M-124.

Для этих же станций был проведен анализ спутниковых измерений общего содержания озона. Это позволяло, во-первых, корректно сравнивать результаты локальных и дистанционных измерений, во-вторых, корректно производить теоретический анализ наблюдаемых особенностей изменения содержания озона на основе сравнения результатов численного моделирования с результатами измерений разного типа. Спутниковые измерения СО проводили с помощью приборов, осуществляющих измерения солнечного излучения (OMI, TOMS, SBUV) [12, 21—23], а также собственного уходящего излучения (MLS, IKFS-2) [32]. Включение данных измерений уходящего излучения особенно важно для полярных районов, так как в течение полярной ночи измерения солнечного излучения отсутствуют.

Для численного моделирования одновременного влияния динамических и фотохимических факторов на изменчивость состава стратосферы в Антарктике использована трехмерная глобальная модель газового состава нижней и средней атмосферы, разработанная в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) [3, 6]. Модель имеет разрешение 4° по широте и долготе и охватывает диапазон от поверх-

Антарктические станции сети WOUDC

Станция	Широта, <i>град ю.</i>	Долгота, <i>град</i>	Прибор	Период, годы	Число измерений
Южный Полюс	89,99	70,24 в.	Dobson, Brewer	1979—2017	6572
Халли-Бей	75,36	26,13 з.	Dobson	1979—2019	8664
Сёва	69,01	39,58 в.	Dobson	1979—2019	8633
Фарадей-Вернадский	65,25	64,26 з.	Dobson	1979—2017	11041
Марамбио	64,23	56,62 з.	Dobson, Brewer	1987—2018	5046
Порт-о-Франс	49,35	70,26 в.	SAOZ	1995—2018	7615
Белграно	77,87	34,63 з.	Brewer	1992—2014	3641
Чжуншань	69,37	76,38 в.	Brewer	1993—2011	2625
Дюмон	66,67	140,02 в.	SAOZ	1988—2018	8785
Конкордия	75,10	123,31 в.	SAOZ	2007—2018	2659
Майтри	70,45	11,45 в.	Brewer	1999—2006	753
Кинг-Джордж	62,15	58,87 з.	Brewer	1998—2014	1051
Сан-Мартин	68,13	67,11 з.	Brewer	2002—2011	1896
Новолазаревская	70,77	11,87 в.	M-124	1988—1989	229
Мирный	66,55	93,30 в.	M-124	1988—1991	441
Восток	78,27	106,51 в.	M-124	1988—1989	200

ности земли до мезопаузы (около 90 км) с переменным шагом по высоте. Выбор глобальной модели обусловлен необходимостью учитывать влияние процессов глобального масштаба при исследовании межгодовой и сезонной изменчивости содержания озона. Исследовали влияние химических и динамических процессов на изменчивость ОСО для станций сети WOUDC. Влияние химических факторов учитывали по результатам расчетов химического состава атмосферы над Антарктикой с учетом газофазных и гетерогенных химических реакций [7]. Гетерогенные химические реакции рассматривали с учетом формирования и эволюции стратосферного сульфатного аэрозоля и полярных стратосферных облаков I и II типов [8, 14]. Динамические факторы исследовали на основе использования данных реанализа MERRA и ERA-Interim. Ежедневные данные реанализа температуры, скорости ветра, влажности воздуха и приземного давления ассимилировали моделью газового состава [6].

Расчеты выполняли за период 1970—2018 гг. Изменчивость состава и структуры с 1970 по 1979 г. рассчитывали с использованием химико-климатической модели Института вычислительной математики Российской академии наук (ИВМ РАН) — РГГМУ [3], имеющей такие же пространственную сетку и химическую схему, как и модель газового состава РГГМУ, но позволяющей одновременно с изменчивостью состава атмосферы рассчитывать изменение динамических параметров (температуры, скорости ветра, влажности и приземного давления). Период до 1980 г. использовался для согласования химических и динамических полей. Начиная с 1980 г. в качестве динамических параметров в расчетах использовали данные реанализа, что позволило учесть реальные измерения динамических полей и улучшить соответствие данных измерений и модельных расчетов. Изменчивость выбросов озоноразрушающих веществ учитывалась заданием потоков химически активных компонентов с поверхности в соответствии с данными WMO-UNEP2011 [32].

Для разделения роли динамических и химических факторов были выполнены модельные расчеты по четырем сценариям. В первом базовом сценарии (psc) принимали во внимание влияние всех учитываемых в модели процессов на изменчивость ОСО в Антарктике [26]. Во втором сценарии (porpsc) в полярных районах не рассматривали образование и эволюцию полярных стратосферных облаков, однако были приняты во внимание гетерогенные процессы на сульфатном аэрозоле [14]. В третьем сценарии (porpsaer) в полярной зоне не учитывали гетерогенные процессы на полярных стратосферных облаках [15] и на поверхности сульфатного аэрозоля, однако анализировали газофазные химические реакции [9]. Наконец, в четвертом сценарии (pochemall) в полярных районах в течение зимы и весны вообще не рассматривали химические реакции разрушения озона.

Аналізу подвергалась сезонная изменчивость содержания озона в 1983 г., когда содержание хлорных и бромных газов, являющихся основными разрушителями озона в весенний период после гетерогенной активации на полярных стратосферных облаках, было еще недостаточно высоко; в 1985 г., когда впервые было обнаружено появление весенней озоновой дыры в Антарктике; в 2002 г., когда в условиях максимального содержания хлорных и бромных газов было зарегистрировано необычно высокое для весеннего периода содержание озона в Антарктике; в 2016 г., когда содержание хлорных и бромных газов стало уменьшаться в результате принятия мер по ограничению выбросов в атмосферу фреонов и галогенов в соответствии с Монреальским протоколом и дополнениями к нему.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены рассчитанные по данным спутниковых и наземных измерений среднегодовые значения ОСО на четырех антарктических станциях, для которых измерения охватывают практически весь исследуемый период с 1980 по 2019 г. Для этих станций приведены линейные тренды, рассчитанные для спутниковых данных SBUV и наземных измерений за весь исследуемый период, а также отдельно для последних 20 лет XX в. и первых 20 лет XXI в. Для всех четырех станций можно выделить общие черты изменчивости общего содержания озона. В частности, тренд ОСО за весь исследуемый период является отрицательным с уровнем значимости 1% и коэффициентами линейного тренда около -1 *е. Д.* в год. Тренд ОСО за два последних десятилетия XX в. также являлся отрицательным, значимым с уровнем значимости 1% и коэффициентом линейного тренда от $-2,5$ до $-3,8$ *е. Д.* в год. Напротив, в течение первых двух десятилетий XXI в. тренд на всех станциях был положительным с низким уровнем значимости (не менее 45%). Тренды по результатам спутниковых и наземных измерений близки за весь исследуемый период и за конец XX в., для станций Халли-Бей и Фарадей-Вернадский оценки существенно расходятся, для станции Южный Полюс спутниковые данные отсутствуют.

Для отдельных станций следует заметить, что только на станции Халли-Бей отмечается значимый с 1%-ным уровнем положительный тренд в XXI в. и только по данным наземных измерений. Впрочем, этот факт связан с резким увеличением регистрируемого на этой станции общего содержания озона в 2017—2019 гг., что может носить технический характер.

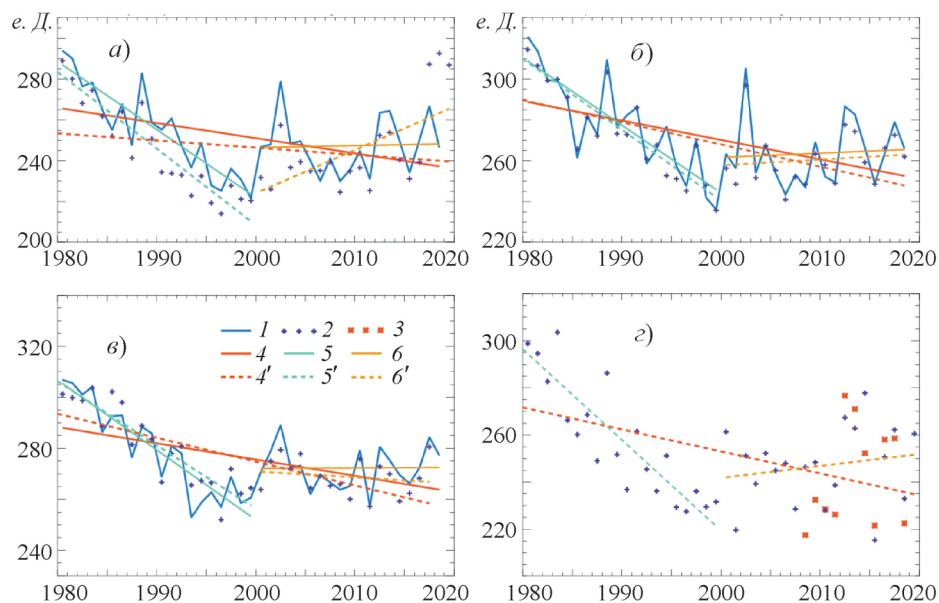


Рис. 1. Межгодовая изменчивость среднегодового общего содержания озона на антарктических станциях Халли-Бей (а), Сёва (б), Фарадей-Вернадский (в) и Южный Полюс (з) по данным спутниковых измерений SBUV (1) и наземных наблюдений приборами Dobson (2) и Brewer (3).

4, 5, 6 — тренды ОСО по данным спутниковых наблюдений, 4', 5', 6' — по данным наземных измерений для периодов 1980—2018 гг. (4, 4'), 1980—2000 гг. (5, 5') и 2000—2018 гг. (6, 6').

По результатам спутниковых наблюдений в эти годы резкого скачка увеличения содержания озона не отмечается, а тренд является нейтральным с очень низким уровнем значимости (около 90%). На станции Фарадей-Вернадский тренд ОСО в начале XXI в. является малозначимым и при этом противоположным по знаку по данным наземных и спутниковых наблюдений. Короткопериодная изменчивость на всех станциях, кроме станции Фарадей-Вернадский, показывает повышенное содержание озона в 1988 г. и на всех станциях, кроме станции Южный Полюс, повышенное содержание озона в 2002 г. Кроме того, измерения на всех станциях демонстрируют периодическое пиковое увеличение содержания озона после 2010 г., имеющее большие амплитуды колебаний по сравнению с наблюдавшимися в конце XX в., а после сильных извержений вулканов Эль-Чичон (1983 г.) и Пинатубо (1991 г.), выбросы которых достигали стратосферы, на всех станциях отмечается усиление разрушения озонового слоя, связанное с увеличением содержания стратосферного сульфатного аэрозоля [17, 31].

На рис. 2 приведена изменчивость общего содержания озона в весенние месяцы на тех же антарктических станциях. Минимальные значения содержания озона наблюдаются в сентябре и октябре, а максимальные — в декабре. При этом на станциях Халли-Бей и Фарадей-Вернадский в XXI в. в сентябре значения общего содержания озона меньше, чем в октябре, а на станциях Сёва и Южный Полюс значения в октябре чуть меньше значений в сентябре для всего исследуемого периода. Тренды в отдельные месяцы в

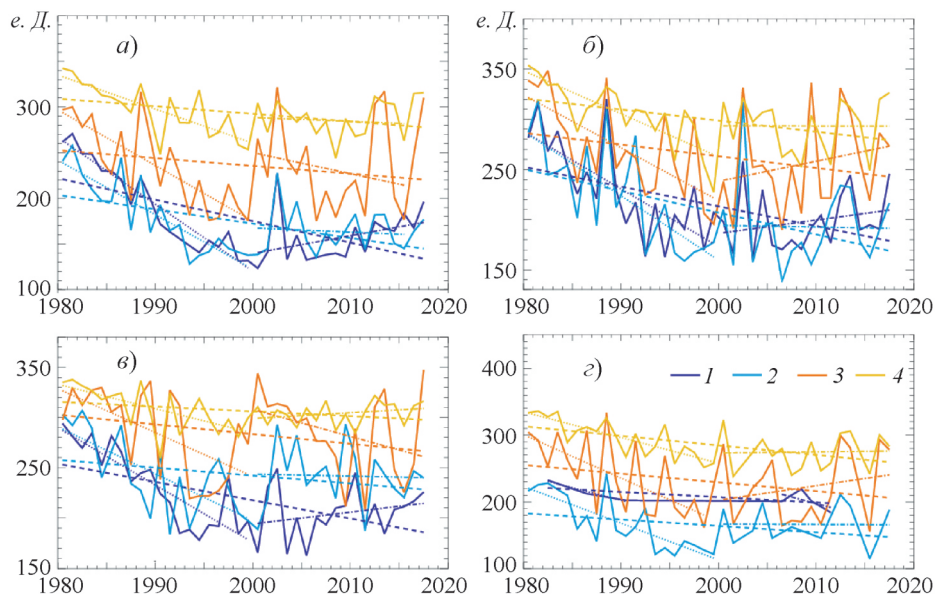


Рис. 2. Межгодовая изменчивость среднегодового общего содержания озона по данным спутниковых измерений SBUV на антарктических станциях Халли-Бей (а), Сёва (б) и Фарадей-Вернадский (в) и по данным наземных измерений на станции Южный Полюс (з) в отдельные месяцы антарктической весны.

1) сентябрь; 2) октябрь; 3) ноябрь; 4) декабрь. Штриховые линии — тренд ОСО за 1980—2018 гг.; пунктирные — за 1980—2000 гг., штрихпунктирные — за 2000—2018 гг. (или за меньший период).

основном повторяют тренды среднегодовых значений, при этом максимальные значения коэффициентов линейного тренда как за весь период, так и максимальные отрицательные в конце XX в. и малозначимые положительные в начале XXI в. отмечаются в сентябре и октябре.

Различия между отдельными станциями связаны с их положением на Антарктическом континенте. Три станции (Халли-Бей, Фарадей-Вернадский, Сёва) расположены близко к побережью, а станция Южный Полюс — вблизи Южного полюса внутри континента. Из станций, расположенных на побережье, Халли-Бей и Фарадей-Вернадский находятся в западном секторе, а станция Сёва — в восточном. Для станций западного сектора максимумы содержания озона 1988 г. формируются, главным образом, за счет процессов в ноябре и, частично, в октябре и декабре. Для восточного побережья для 1988 г. характерно формирование максимальных значений ОСО уже в сентябре и октябре и сохранение их до декабря. На станции Южный Полюс из-за большей продолжительности полярной ночи отсутствуют спутниковые данные, а наземные для сентября имеются лишь эпизодически, поэтому имеет смысл анализировать результаты измерений только с октября. Здесь, так же как на станции Сёва, в 1988 г. уже в октябре отмечался максимум содержания озона, который сохранялся до декабря.

В 2002 г., когда, как видно на рис. 1, также наблюдались необычно большие значения ОСО на всех станциях, кроме станции Южный Полюс, увеличенное содержание озона отмечалось уже в сентябре и сохранялось до декабря. На станции Южный Полюс максимум содержания озона на-

блюдался в 2001 г., причем, в отличие от других станций, где в декабре максимум 2002 г. был уже менее выражен по сравнению с предшествующими месяцами, на этой станции в декабре 2001 г. сохранялся хорошо выраженный максимум по сравнению с другими годами. В целом по всем станциям наибольшая межгодовая изменчивость ОСО наблюдается в ноябре, когда уже отмечаются процессы разрушения циркумполярного вихря, которые в отдельные годы могут происходить по-разному в зависимости от динамических условий, изменчивости температуры поверхности океана и влияния внезапных стратосферных потеплений.

На рис. 3 приведена сезонная изменчивость среднесуточных значений общего содержания озона на станции Фарадей-Вернадский в 2002 г., для которой, как видно на рис. 2, зафиксировано отличающееся от других станций изменение содержания озона с большими значениями в сентябре и октябре и отсутствием межгодового максимума в ноябре. Помимо спутниковых данных SBUV, на основе которых приведены результаты рис. 2, на рис. 3 представлены данные измерений прибором TOMS со спутника "Earth Probe" и результаты численного моделирования с использованием численной модели газового состава нижней и средней атмосферы РГГМУ по описанным выше сценариям.

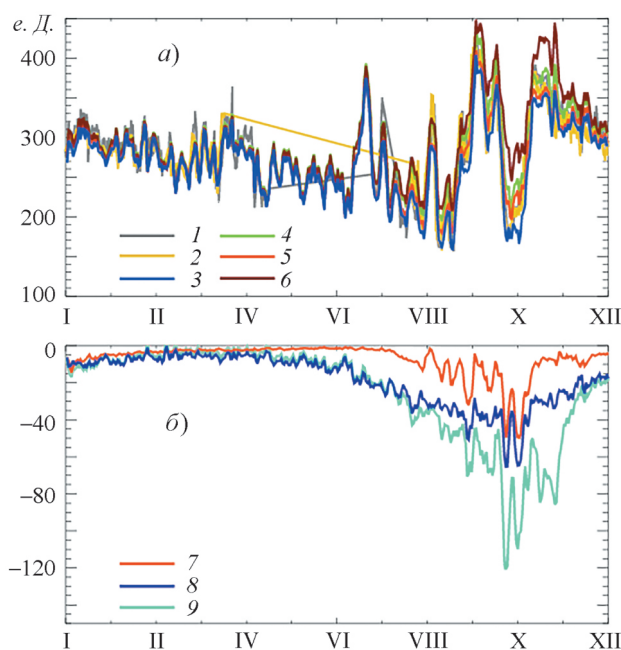


Рис. 3. Изменение общего содержания озона на станции Фарадей-Вернадский в 2002 г. по данным спутниковых измерений (1, 2) и численного моделирования (3—6) по разным сценариям (а) и разность между базовым модельным расчетом (psc), в котором учитываются все химические процессы разрушения озона как в газофазных процессах, так и с участием гетерогенных реакций, и сценариями без учета гетерогенных процессов на поверхности сульфатного аэрозоля (поаer; 7), полярных стратосферных облаков (popsc; 8) и всех химических реакций разрушения озона в антарктическом регионе (nochemall; 9).

На рисунке а расчеты по сценариям: 3) psc; 4) popsc; 5) popsaer; 6) nochemall.

Результаты измерений обоих спутниковых приборов хорошо совпадают как между собой, так и с данными численного моделирования. Для сезонной изменчивости содержания озона хорошо видна роль динамических процессов начиная со второй половины 2002 г., приводящая к значительным колебаниям содержания озона с амплитудами до 150 *е. Д.* Для весеннего периода в сентябре отмечается начало появления озоновой дыры по аналогичному с предыдущими годами сценарию, однако во второй половине сентября влияние внезапного стратосферного потепления приводит к увеличению общего содержания озона до значений более 400 *е. Д.* Высокое содержание озона сохраняется до середины октября, после чего также стремительно падает до значений менее 200 *е. Д.* Далее в ноябре вновь происходит увеличение содержания озона, связанное с окончательным разрушением циркумполярного вихря и интенсификацией обмена антарктического воздуха с воздухом средних широт с большим содержанием озона.

Сравнение результатов численных расчетов с помощью модели, в которой динамические данные задавались из реанализа ERA-Interim, показывает, что для всех сценариев все кратковременные колебания общего содержания озона, наблюдаемые по спутниковым данным, качественно хорошо воспроизводятся (рис. 3а). Даже для сценария poschemall, в котором не учитываются все химические процессы разрушения озона, точно воспроизводятся все наблюдаемые максимумы и минимумы в течение полярной зимы, что объяснимо, так как химические процессы в этот период происходят очень медленно, как и все отмечаемые по спутниковым данным колебания общего содержания озона после возвращения Солнца антарктической весной. При этом весной в данном сценарии происходит недооценка уменьшения содержания озона в периоды наблюдаемых по спутниковым измерениям его минимальных значений в первой половине сентября и в конце октября — начале ноября. В количественном отношении, как показывает анализ рис. 3б, роль всех химических процессов разрушения озона в максимуме в конце октября 2002 г. достигает 120 *е. Д.*, а в остальные периоды антарктической весны колеблется от 30 до 80 *е. Д.*

Из сравнения остальных сценариев численного моделирования изменчивости общего содержания озона с базовым сценарием rsc, в котором учитываются все химические процессы разрушения озона как в газофазных химических реакциях, так и с участием гетерогенных реакций на поверхности сульфатного аэрозоля и полярных стратосферных облаков, можно количественно оценить отдельное влияние этих процессов. Так, неучет влияния гетерогенных процессов на поверхности сульфатного аэрозоля приводит к недооценке разрушения озона при максимальном развитии озоновой дыры до 50 *е. Д.*, а в остальное время полярной весны — от 10 до 30 *е. Д.*, для сценария, в котором не учитывается роль гетерогенных процессов на поверхности полярных стратосферных облаков, недооценка составляет около 60 *е. Д.* в конце октября — начале ноября и около 30—40 *е. Д.* в остальное время (рис. 3б).

4. Основные выводы

На основании анализа результатов спутниковых и наземных измерений и данных численных экспериментов с моделью газового состава нижней и

средней атмосферы проведен анализ межгодовой и сезонной изменчивости общего содержания озона в Антарктике. На основании данных спутниковых и наземных измерений рассчитаны тренды изменения общего содержания озона на четырех антарктических станциях, для которых есть результаты наземных измерений за весь период с 1980 по 2018 г. Результаты численного моделирования использованы для анализа влияния динамических и химических процессов на сезонное изменение общего содержания озона.

По результатам исследования за весь исследуемый период 1980—2018 гг. отмечается значимый (с уровнем значимости 1%) отрицательный тренд ОСО со средним коэффициентом линейного тренда $-0,8$ *е. Д.* в год. В течение последних 20 лет XX в. также значимый (с уровнем значимости 1%) отрицательный тренд общего содержания имеет средний коэффициент $-3,3$ *е. Д.* в год. В течение первых 20 лет XXI в. по измерениям на антарктических станциях можно отметить слабый, малозначимый, но положительный тренд общего содержания озона. Средний коэффициент линейного тренда для начала XXI в. составляет $0,42$ *е. Д.* в год. Анализ межгодовой изменчивости общего содержания озона для отдельных месяцев антарктической весны показывает, что наименьшие значения ОСО наблюдаются в сентябре — октябре, причем в XXI в. значения в сентябре часто меньше значений в октябре из-за большего влияния динамических процессов на разрушение циркумполярного вихря во второй половине весны.

Результаты численных экспериментов с моделью газового состава по нескольким сценариям, в которых отключалось влияние химических процессов на разрушение антарктического озона в газофазных химических реакциях, а также влияние гетерогенных процессов на стратосферном сульфатном аэрозоле и полярных стратосферных облаках, позволили количественно оценить воздействие этих процессов на разрушение озона антарктической весной. Результаты модельных расчетов показали, что только за счет динамических процессов, влияющих на устойчивость циркумполярного вихря и обмен воздухом с умеренными широтами, содержание озона в отдельные периоды может уменьшаться (увеличиваться) на $100—150$ *е. Д.*, за счет гетерогенной активации хлорных и бромных газов на сульфатном аэрозоле — максимально до $50—60$ *е. Д.*, за счет процессов с участием полярных стратосферных облаков — до $60—70$ *е. Д.*, за счет всего химического разрушения — до $100—120$ *е. Д.*

Авторы выражают благодарность рецензенту за полезные замечания.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках государственного задания Министерства высшего образования и науки Российской Федерации (проект 5.6493.2017/8.9). Работы по исследованию влияния динамических параметров на содержание озона в полярных районах выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект 19-17-00198), по изучению влияния химических процессов — при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-05-01277).

Литература

1. Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. Озонный щит Земли и его изменения. — СПб, Гидрометеоздат, 1992, 288 с.
2. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. — Л., Гидрометеоздат, 1987, 291 с.
3. Галин В. Я., Смышляев С. П., Володин Е. М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2007, т. 43, № 4, с. 437—452.
4. Кароль И. Л., Розанов В. В., Тимофеев Ю. М. Газовые примеси в атмосфере. — Л., Гидрометеоздат, 1983, 192 с.
5. Перов С. П., Хргиан А. Х. Современные проблемы атмосферного озона. — Л., Гидрометеоздат, 1980, 288 с.
6. Смышляев С. П., Виролайнен Я. А., Моцаков М. А., Тимофеев Ю. М., Поберовский А. В., Поляков А. В. Межгодовые и сезонные вариации содержания озона в разных высотных слоях атмосферы Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2017, т. 53, № 3, с. 343—359.
7. Смышляев С. П., Галин В. Я., Атласкин Е. М., Блакитная П. А. Моделирование непрямого влияния одиннадцатилетнего цикла солнечной активности на газовый состав атмосферы. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2010, т. 46, № 5, с. 672—684.
8. Смышляев С. П., Галин В. Я., Шаарийбуу Г., Моцаков М. А. Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2010, т. 46, № 3, с. 291—306.
9. Смышляев С. П., Погорельцев А. И., Галин В. Я., Дробашевская Е. А. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных регионов. — Геомагнетизм и аэрономия, 2016, т. 56, № 1, с. 102—116.
10. Хргиан А. Х. Физика атмосферного озона. — Л., Гидрометеоздат, 1973, 296 с.
11. Andersen S. B., Austin J., Isaksen I., Pitari G., et al. Comparison of recent modeled and observed trends in total column ozone. — *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, No. D1, 4428; doi: 10.1029/2002JD002871.
12. Bhartia P. K., McPeters R. D., Flynn L. E., Taylor S., Kramarova N. A., Frith S., Fisher B., and DeLand M. Solar Backscatter UV (SBUV) total ozone and profile algorithm. — *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, vol. 6, pp. 2533—2548; <https://doi.org/10.5194/amt-6-2533-2013>.
13. DeWolfe A. W., Wilson A., Lindholm D. M., Pankratz C. K., Snow M. A., and Woods T. N. Solar Irradiance Data Products at the LASP Interactive Solar Irradiance Data Center (LISIRD). — *Amer. Geophys. Union, Fall Meeting 2010*, abstract No. GC21B-0881.
14. De Zafra R. and Smyshlyayev S. On the formation of HNO₃ in the Antarctic mid-to-upper stratosphere in winter. — *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, pp. 23115—23125.
15. Hamil P. and Toon O. B. Polar stratospheric clouds and the ozone hole. — *Physics Today*, 1991, vol. 44, No. 12, pp. 34—42.
16. Harvey V. L., Pierce R. B., and Hitchman M. H. A climatology of stratospheric polar vortices and anticyclones. — *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, No. D20, pp. 4442; doi: 10.1029/2001JD001471.
17. Ivy D. and Solomon S. Radiative and dynamical influences on polar stratospheric temperature trends. — *J. Climate*, 2016, vol. 29, pp. 4927—4938.
18. Jacob J. D. *Introduction to Atmospheric Chemistry*. — Princeton University Press, 1999, 264 p.
19. Jacobson M. Z. *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. — Cambridge University Press, 2005, 813 p.
20. Manney G., Sabutis J., Allen D., Lahoz W., Scaife A., et al. Simulations of dynamics and transport during the September 2002 Antarctic major warming. — *J. Atmos. Sci.*, 2005, vol. 62, pp. 690—707.
21. McPeters R. D., Hollandsworth S. M., Flynn L. E., Herman J. R., and Seftor C. J. Long-term ozone trends derived from the 16-year combined Nimbus7/Meteor 3 TOMS Version 7 record. — *Geophys. Res. Lett.*, 1996, vol. 23, pp. 3699—3702.

- 22. McPeters R. D., Krueger A. J., Bhartia P. K., Herman J. R., Oaks A., Ahmad Z., Cebula R. P., Schlesinger B. M., Taylor S., Torres O., and Willemeier C. G.** Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Product's User's Guide. — Washington, DC, National Aeronautics and Space Administration, NASA Reference Publication 1384, 1996.
- 23. McPeters R. D. and Labow G. J.** An assessment of the accuracy of 14.5 years of Nimbus 7 TOMS Version 7 ozone data by comparison with the Dobson network. — *Geophys. Res. Lett.*, 1996, vol. 23, pp. 3695—3698.
- 24. Newman P. A., Daniel J. S., Waugh D. W., and Nash E. R.** A new formulation of Equivalent Effective Stratospheric Chlorine (EESC). — *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, vol. 7, pp. 4537—4552.
- 25. Nishii K. and Nakamura H.** Tropospheric influence on the diminished Antarctic ozone hole in September 2002. — *Geophys. Res. Lett.*, 2004, vol. 31, GL019532.
- 26. Peters D. and Vargin P.** Impact of extratropical Rossby wave trains on planetary wave activity in the polar southern lower stratosphere in September 2002. — *Tellus A*, 2015, vol. 67, 25875.
- 27. Seinfeld J. H. and Pandis S. N.** *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change.* — John Wiley and Sons, 1998, 1203 p.
- 28. Smyshlyaev S. P. and Geller M. A.** Analysis of SAGE-II observations using data assimilation by the SUNY-SPB two-dimensional model and comparison to TOMS data. — *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2001, vol. 106, No. D23, pp. 32327—32335.
- 29. Solomon S.** Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. — *Rev. Geophys.*, 1999, vol. 37, pp. 275—316.
- 30. Solomon S., Garcia R. R., Rowland F. S., and Wuebbles D. J.** On the depletion of Antarctic ozone. — *Nature*, 1986, vol. 321, pp. 755—758.
- 31. Solomon S., Ivy D., Kinnison D., Mills M., Neely R., and Schmidt A.** Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. — *Science*, 2016, 353(6296):269-74; doi: 10.1126/science.aae0061.
- 32. WMO (World Meteorological Organization):** Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 52. — Geneva, Switzerland, WMO, 2011, 516 p.
- 33. WMO:** Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014 Global Ozone Research and Monitoring Project Report. — Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2014, 416 p.
- 34. World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC);** <http://woudc.org/>.

Поступила в редакцию 2 XII 2019 г., после доработки 6 XII 2019 г., принята к публикации 16 XII 2019 г.

NUMERICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF PHYSICAL AND CHEMICAL FACTORS ON THE INTERANNUAL VARIABILITY OF ANTARCTIC OZONE

S. P. Smyshlyaev, P. A. Blakitnaya, and M. A. Motsakov

The variability of Antarctic total ozone during the period of 1980 to 2018 is considered. The trends in Antarctic total ozone during the study period as well as the physical and chemical processes affecting the seasonal variability of total ozone are analyzed. The main attention is paid to the influence of dynamic processes on the stability of the Antarctic circumpolar vortex, to the formation of polar stratospheric clouds, and to the influence of gas-phase and heterogeneous processes on the surface of polar stratospheric clouds and sulfate aerosol. The method of research is the analysis of the results of ground and satellite observations and numerical modeling of physical and chemical processes over the Antarctic using a global model of atmospheric composition with the dynamic parameters specified from reanalysis data.